



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘÍMÝ VSTŘIK BENZÍNU

GASOLINE DIRECT INJECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Donutil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jan Donutil**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přímý vstřík benzínu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje benzínových motorů spalující chudé směsi paliva se vzduchem s ohledem na obsah škodlivin ve výfukových planech - použití filtrů pevných částic pro benzínové motory.

Cíle bakalářské práce:

Uvedení přehledu komponentů systému, popis jejich funkce. Výhody a nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů. Specifické součásti výfukového systému. Přehled pohonných jednotek s přímým vstřikem benzínu.

Seznam literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím přímého vstřikování u zážehových motorů. Vysvětluje princip činnosti a výhody oproti starším způsobům tvorby směsi. Uvádí jednotlivé komponenty a aktuální přehled nabízených pohonných jednotek. V závěru se zabývá budoucím vývojem těchto motorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přímý vstřík, benzín, zážehový motor, vrstvené plnění, chudá směs, homogenní směs.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with direct injection applicated in spark ignition engine. It explains how the system works and what are the benefits in comparison with older methods. Components description and a list of current engines are mentioned in the next chapter. The last section is focussed on the future of these motors.

KEYWORDS

Direct injection, petrol, gasoline, spark ignition engine, stratified charge, lean mixture, homogeneous mixture.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DONUTIL, J. Přímý vstřík benzínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Jan Donutil

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za ochotu a užitečné rady, které mi pomohly při psaní bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	8
1 Historie	9
2 Princip činnosti	10
2.1 Směšovací poměr a součinitel přebytku vzduchu	10
2.2 Tvorba směsi	10
2.2.1 Vnější tvorba směsi	11
2.2.2 Vnitřní tvorba směsi	12
2.3 Řízené spalování	13
2.4 Druhy provozu motoru	14
3 Popis komponentů	17
3.1 Palivový systém	17
3.1.1 Nízkotlaký okruh	18
3.1.2 Vysokotlaký okruh	18
3.1.3 Tlakový zásobník paliva	19
3.1.4 Vstřikovací ventily	20
3.2 Výfukový systém	21
3.2.1 Lambda sondy	21
3.2.2 Katalyzátory	23
3.2.3 Recirkulace výfukových plynů	23
3.2.4 Filtr pevných částic	24
4 Přehled pohonných jednotek	26
5 Budoucnost motorů s přímým vstřikováním benzínu	28
5.1 HCCI	28
5.2 Motor s proměnlivým kompresním poměrem	29
Závěr	31
Použité informační zdroje	32
Seznam použitých zkratk a symbolů	35

ÚVOD

S neustále rostoucím počtem automobilů je třeba přísněji regulovat jejich dopad na životní prostředí. V dnešní době jsou přístroje schopné přesně měřit složení výfukových plynů a lze tak snadno kontrolovat dodržení emisních limitů. Stále více se také projevuje cena neobnovitelných pohonných hmot. Cílem moderních spalovacích motorů je tak především snaha o získání maximálního výkonu z každé kapky paliva, při současném zanechání co možná nejmenší ekologické stopy.

Účinnost a emise – právě tyto dva parametry jsou dnes pro automobilky největší motivací pro hledání nových technologií. Lepší účinnosti i menších emisí lze docílit přesnějším odměřováním paliva a rozlišováním režimů, při kterých je zapotřebí více výkonu, a při kterých stačí pouze minimum. To je dnes možné díky vyspělé elektronice a systému vstřikování. Nepřímé vstřikování má své limity kvůli provozu se stechiometrickým poměrem. Do popředí se tak dostává vstřikování přímé, kde je možná aplikace i velmi chudé spalovací směsi, která znamená zásadní snížení spotřeby.

1 HISTORIE

Přestože přímé vstřikování u zážehových motorů zaznamenává velký růst teprve během posledních dvou desetiletí, má tato technologie své kořeny již na počátku minulého století. Za autora vynálezu se považuje Francouz Léon Levavasseur, který systém použil v letadlovém motoru Antoinette 8V v roce 1906. Po první světové válce se o další vývoj přímého vstřikování v letectví zasloužil švédský konstruktér Jonas Hesselman. Během druhé světové války se systém využíval v řadě německých, amerických a sovětských letadel. [1]

První použití přímého vstřikování benzínu v automobilovém motoru se uskutečnilo téměř po půlstoletí od Levavasseurova vynálezu. Toto prvenství si v roce 1952 připsaly automobily německé výroby Gutbrod Superior 600 a Goliath 700 GP. Motory obou aut byly vybaveny vstřikováním firmy Bosch. Tato vozidla se ale v prodeji dlouho neudržela kvůli vysokým výrobním i provozním nákladům, a tak se přešlo zpět k levnějším řešením tvorby směsi. Se stejným systémem byl o dva roky později představen i slavný sportovní vůz Mercedes-Benz 300 SL „Gullwing“. [2]



Obr. 1 Mercedes-Benz 300 SL [3]

Vzhledem k neúspěchu prvních dvou zmiňovaných automobilů se ale o žádný přelom nejednalo. Za nejdůležitější mezník se tedy považuje rok 1997, kdy japonská automobilka Mitsubishi představila svůj systém GDI (Gasoline Direct Injection) pro sériově vyráběné osobní vozy. V Evropě ji následoval koncern Volkswagen, když v roce 2000 uvedl na trh model Lipo 1,4 FSI opět se systémem vstřikování od společnosti Bosch. [4]

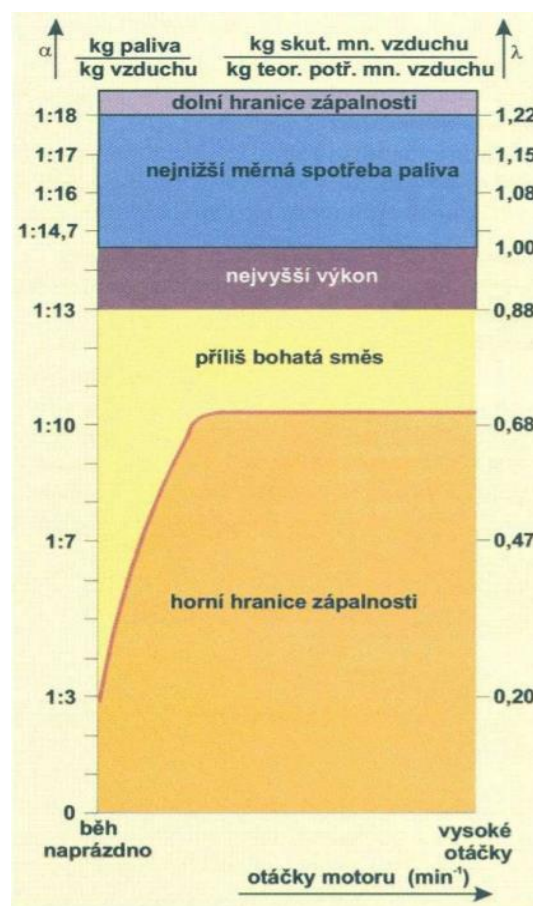
2 PRINCIP ČINNOSTI

2.1 SMĚŠOVACÍ POMĚR A SOUČINITEL PŘEBYTKU VZDUCHU

Každé palivo potřebuje k hoření kyslík a lze pro něj vyjádřit ideální teoretické množství vzduchu, při kterém dojde k jeho úplnému spálení. Ideální poměr těchto dvou složek se nazývá stechiometrický směšovací poměr a pro benzín je roven hodnotě 14,7:1, tedy 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva. Pro vyjádření složení spalovací směsi se ale běžněji používá součinitel přebytku vzduchu λ , který je vyjádřen vztahem:

$$\lambda = \frac{\text{skutečně přivedená hmotnost vzduchu}}{\text{hmotnost vzduchu potřebná pro stechiometrické spalování}}$$

Pokud skutečně přivedená hmotnost vzduchu odpovídá teoretické potřebě, jedná se o stechiometrickou směs a její součinitel lambda je roven jedné. Pro nedostatek vzduchu (bohatou směs) je hodnota lambdy menší než jedna, naopak pro přebytek vzduchu (chudou směs) je větší. Nejvyššího výkonu a nejlepších podmínek zážehu dosahuje mírně bohatá směs, $\lambda = 0,85-0,95$. Chudá směs se vyznačuje sníženým výkonem, za to však nižší spotřebou paliva. Směšovací poměr ale nelze zmenšovat či zvětšovat zcela libovolně. Jak je patrné z obrázku č. 2, musí být udržován mezi určitými hranicemi, aby byla zaručena zápalnost směsi. Pro zážehové motory se lambda musí pohybovat přibližně v hodnotách od 0,7 do 1,3. [5][6]



Obr. 2 Směšovací poměr a součinitel lambda [22]

2.2 TVORBA SMĚSI

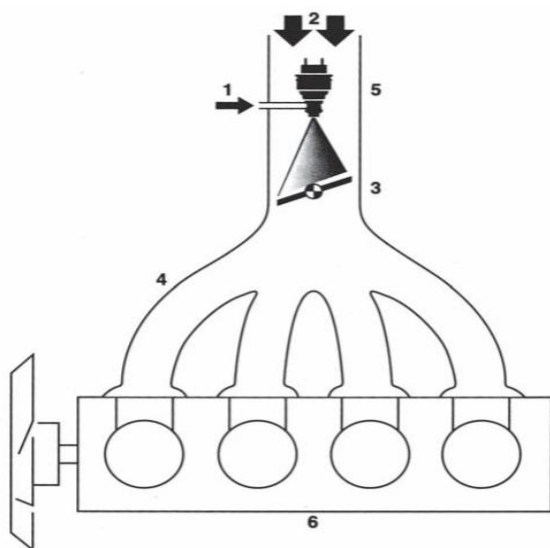
U zážehových motorů se směs paliva a vzduchu při kompresním zdvihu zahřívá na teplotu 400 až 500 °C, tedy na teplotu nedostatečnou pro samovznícení, a proto k zážehu musí

být použita jiskra z vnějšího zdroje v podobě elektrické svíčky. Tvorba spalovací směsi se rozděluje na vnitřní a vnější. [7]

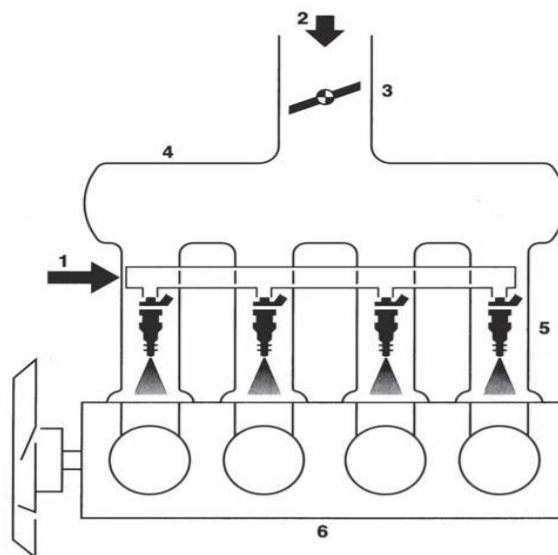
2.2.1 VNĚJŠÍ TVORBA SMĚSI

K vnější tvorbě směsi dochází ještě před nasátím do válce v sacím potrubí. Nejstarším a dnes již u automobilů nepoužívaným způsobem je karburátor. U karburátoru dochází k mísení ve směšovací komoře, kterou tvoří difuzor s náběžnou hranou a rozšiřující se částí. V zužující se části difuzoru dochází k urychlování proudu vzduchu a tím i k vytváření podtlaku, díky čemuž je palivo vysáváno z rozprašovače uloženého v nejužším bodě komory. Zrychlení vzduchu je navíc potřebné k dobrému rozprášení kapiček paliva. Z toho důvodu je kvalita promísení směsi ve velké míře závislá na otáčkách motoru, což je jedním z hlavních záporů karburátoru. [6]

U moderních zážehových motorů se spalovací směs vytváří pomocí vstřikování benzínu. Tento způsob má oproti karburátoru řadu výhod, neboť lze díky řídicí jednotce snadno regulovat přesné množství vstřikovaného paliva v závislosti na režimu motoru. Tím je zaručen ideální směšovací poměr a potřebný výkon, zároveň se snížením spotřeby a nízkým podílem škodlivých látek ve výfukových plynech. U nepřímého vstřikování se rozlišují dva základní systémy – centrální CFI (Central Fuel Injection) a vícebodový MPI (Multi Point Injection). [7]



Obr. 3 CFI; 1 – palivo; 2 – vzduch; 3 – škrticí klapka; 4 – sací potrubí; 5 – vstřikovací ventil, 6 – motor [7]



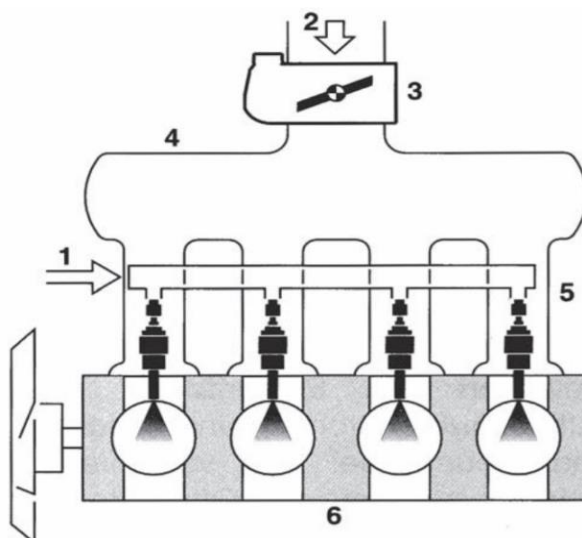
Obr. 4 MPI; 1 – palivo, 2 – vzduch, 3 – škrticí klapka, 4 – sací potrubí, 5 – vstřikovací ventily, 6 – motor [7]

Centrální (CFI) neboli jednobodové (SPI) vstřikování benzínu využívá jediný vstřikovací ventil pro všechny válce umístěný nad škrticí klapkou. Jedná se o nejjednodušší a

nejlevnější typ vstřikování s několika nedostatky, kterými se stále podobá karburátoru. Sem patří nerovnoměrné rozdělení palivové směsi do jednotlivých válců, což je způsobeno vytvářením směsi ještě před rozvětvením sacího potrubí, srážením kapiček paliva na chladných stěnách potrubí a jeho aerodynamickými vlastnostmi. Vstřikováním paliva před škrtkicí klapkou vzniká i další nevýhoda. Tou je opožděná odezva systému na přechody mezi režimy motoru způsobená vzdáleností, kterou musí směs urazit od místa vstřiků k sacímu ventilu motoru. Těchto nedostatků je zbaven **systém MPI** (v anglické literatuře také označovaný jako PFI), u kterého je palivo vstřikováno do jednotlivých větví sacího potrubí, přičemž paprsek paliva je nasměrován před sací ventil válce. [6][7]

2.2.2 VNITŘNÍ TVORBA SMĚSI

U přímého vstřikování benzínu dochází k tvorbě směsi až uvnitř spalovacího prostoru. Oproti nepřímému vstřikování tak má výhodu v tom, že se zde palivo nemá možnost usazovat na stěnách sacího potrubí, díky čemuž lze i přesněji odměřovat potřebné množství paliva. Ve výsledku je možné dosáhnout nižší spotřeby až o 40 % a nižších emisí plynů CO_2 . Na rozdíl od metod využívajících vnější tvorbu zde výkon motoru není řízen škrtkicí klapkou, ale měnícím se složením zápalné směsi. Ta může být vrstvená nebo homogenní. [7]



Obr. 5 Přímé vstřikování benzínu: 1 - palivo, 2 - vzduch, 3 - škrtkicí klapka, 4 - sací potrubí, 5 - vstřikovací ventily, 6 – motor [7]

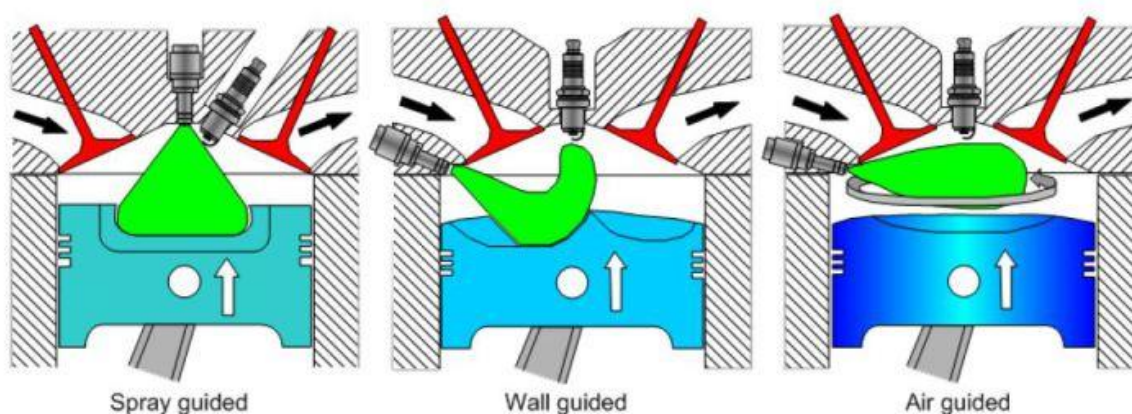
Při plném zatížení motoru se používá směs homogenní o stechiometrickém poměru. Pro dosažení rovnoměrného složení směsi a tím i ideálních podmínek vznícení, se palivo vstřikuje do spalovací komory v širokém kuželu již během sacího zdvihu. [7]

Při částečném zatížení motoru a při nízké rychlosti se pracuje s velmi chudou směsí o součiniteli přebytku vzduchu $\lambda = 2,7 - 3,4$, tedy o směšovací poměru až 1:50. Nedostatek

paliva je takový, že se směs nachází dokonce nad dolní hranici zápalnosti. Zažehnutí je však možné díky kontrolovanému rozvrstvení paliva ve vzduchu. U takovéto nehomogenní směsi se v blízkosti zapalovací svíčky musí nacházet bohatá oblast, která je dobře zapalitelná, a hlavní průběh spalování se následně odehrává v chudé oblasti. Vrstvy po obvodu válce se při tom mohou skládat z čistého vzduchu nebo nehořlavých výfukových plynů. Pro toto rozvrstvení paliva je zapotřebí speciálně tvarovaná spalovací komora, sací kanály v téměř svislé poloze pro usměrnění proudu nasávaného vzduchu a na rozdíl od homogenního režimu musí být benzín vstřikován až před koncem kompresního zdvihu. [7]

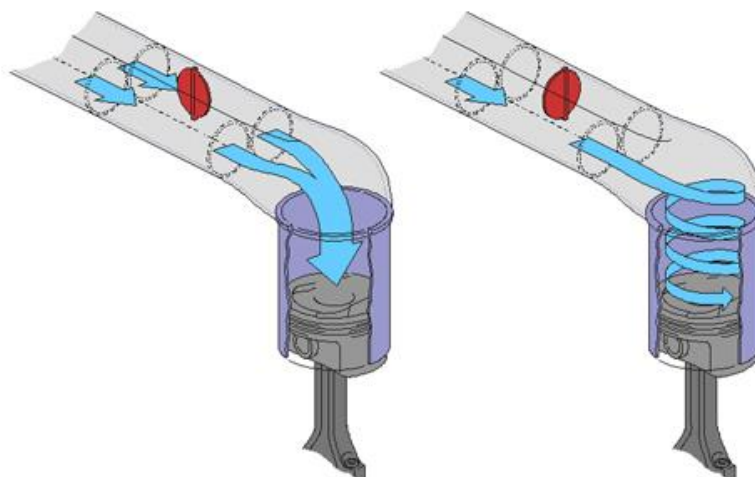
2.3 ŘÍZENÉ SPALOVÁNÍ

U motorů s přímým vstřikováním benzínu se rozlišují tři základní metody – spalování řízené vzduchem, stěnou a paprskem. [4]



Obr. 6 Spalování řízené paprskem, stěnou a vzduchem [20]

Spalování řízené vzduchem (air-guided injection) využívá k rozptýlení paliva kontrolované proudění vzduchu nasávaného dvěma sacími kanály. V jednom kanále se nachází škrticí klapka, která je při malém zatížení motoru uzavřena. Vzduch je nasáván pouze druhým kanálem, což ve válci vyvolává silný vír, tzv. swirl efekt, který urychluje hoření chudé směsi a zároveň brání smáčení stěn. Při plném zatížení je klapka otevřena a dochází k převalování vzduchu, tzv. tumble efektu, kdy vzduch rotuje ve vertikální rovině. Vstřikovací tryska je umístěna na straně komory pod úhlem ke kolmé ose válce. Tato metoda řízeného spalování se však v některých zdrojích neuvádí, neboť i u ostatních metod hraje řízený pohyb vzduchu ve válci velkou roli. [6]



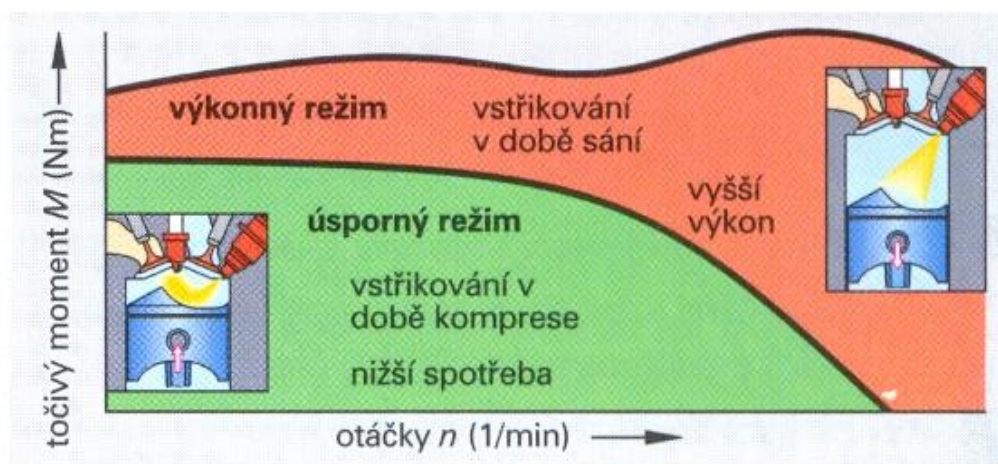
Obr. 7 Tumble a swirl efekt [23][9]

Spalování řízené stěnou (wall-guided injection), je starší metodou využívající injektor s nižším tlakem (cca 50 barů), který obvykle bývá umístěn na boku spalovacího prostoru. Umístěním na straně sacích ventilů lze zabránit kontaktu paliva s výfukovými ventily, které mají vyšší teploty. Pro tento způsob tvorby vrstvené směsi je třeba zvláště tvarovaného pístu s prohlubní ve dně. Injektor je nasměrován právě do této prohlubně a vstřikované palivo je po styku s ní usměrněno k zapalovací svíčce, kde se vytvoří oblast bohaté směsi. Okamžik vstřiku je tak limitovaný pozicí pístu, což nemusí vést k optimálnímu časovému rozvržení spalování. V důsledku interakce paliva s pístem vzniká na jeho povrchu vrstva kapaliny a pokud se neodpaří dostatečně rychle, dochází k emisím pevných částic ve zvýšené míře. [8]

U **spalování řízeného paprskem (SGDI)** se tolik nespolehá na tvar spalovací komory. Důležitější jsou zde parametry a typ vstřikovací trysky, která může být umístěna jak na straně, tak i uprostřed spalovacího prostoru hned vedle zapalovací svíčky. Využívá se vyšších tlaků (150 až 200 barů) a obvykle trysek typu A či trysek víceotvorových pro dosažení co nejjemnějšího rozprašení paliva. Při homogenním režimu má tato metoda oproti předchozí výhodu v lepší objemové účinnosti a v menších emisích pevných částic a nespálených uhlovodíků v důsledku vyšších vstřikovacích tlaků. V režimu vrstvené směsi může motor pracovat i ve vyšších otáčkách – nárůst přibližně z 3000 na 4000 otáček za minutu. [8]

2.4 DRUHY PROVOZU MOTORU

Kromě dvou základních režimů již zmíněných dříve existuje i několik dalších, které se liší v počátku a počtu vstřiků a samozřejmě ve směšovací poměru. Aby se zamezilo skokové změně točivého momentu, a přechod mezi režimy byl plynulý, dochází ke krátkodobé změně předstihu zapalování. [5]



Obr. 8 Druhy provozu motoru s přímým vstřikováním [25]

Provoz s vrstveným plněním pracuje s velmi chudou směsí a používá se při nízkém zatížení motoru. S rostoucím zatížením se vstřikuje více paliva a směs se tak stává bohatší. Ve vyšších otáčkách nelze dosáhnout potřebného rozvrstvení směsi a dochází k lokálnímu nedostatku kyslíku, který se projeví tvorbou sazí. Použití tohoto módu je tedy omezeno otáčkami. Provoz s vysokým přebytkem vzduchu také produkuje větší podíl plynů NO_x . Pro omezení produkce těchto plynů se využívá recirkulovaných výfukových plynů (EGR), které snižují spalovací teplotu. [6]

Provoz s homogenní směsí se používá při vyšších otáčkách. Palivo se vstřikuje během sání v potřebném množství pro stechiometrické nebo mírně obohacené složení směsi kvůli dosažení maximálního výkonu. Při tomto provozu vzniká relativně malé množství škodlivých látek. Bohatější směs navíc umožňuje regeneraci zásobníkového katalyzátoru. [6]

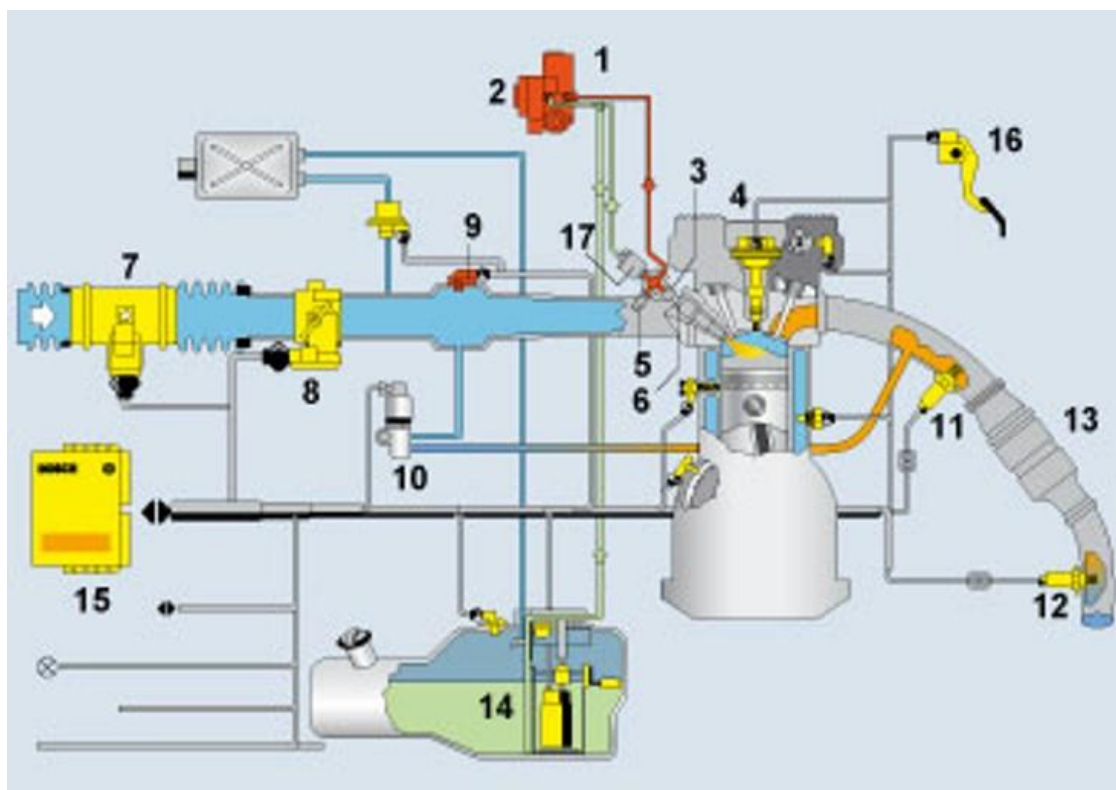
Provoz s homogenní chudou směsí funguje jako přechodový stav mezi provozem s homogenní a vrstvenou směsí. Palivo je vstřikováno během sacího zdvihu stejně jako u předchozího režimu. V důsledku nedostatku paliva však dochází ke zvýšeným emisím oxidů dusíku, stejně jako tomu je u vrstvené směsi. [6]

U homogenního provozu s vrstveným plněním se nejprve vstříkne malé množství paliva během sání tak, aby vznikla stejnorodá chudá směs. Podstatná část paliva je následně přidána druhým vstřikem na konci kompresního zdvihu, čímž dojde k vytvoření vrstvené směsi. Tento způsob má výhodu v menších emisích pevných částic a menším sklonu k detonačnímu hoření. Díky tomu může být použit vyšší kompresní poměr, což vede k nižší spotřebě a emisím. [6]

Provoz s vrstveným plněním a zahříváním katalyzátoru se využívá po startu studeného motoru. Průběh je nejprve stejný jako u normálního provozu s vrstveným plněním. Po zažehnutí a spálení směsi se zde ale provádí druhý vstřik během expanze. Následuje tak druhá fáze

spalování, která má za následek zvýšení teploty výfukových plynů a díky tomu i rychlé zahřátí katalyzátoru na provozní teplotu. [6]

3 POPIS KOMPONENTŮ



Obr. 9 Bosch MED Motronic: 1 – vysokotlaké čerpadlo, 2 – regulátor tlaku paliva, 3 – tlakový zásobník, 4 – zapalovací cívka, 5 – snímač tlaku paliva, 6 – vstřikovací ventil, 7 – měřič hmotnosti vzduchu se snímačem teploty, 8 – elektronicky ovládaná škrticí klapka EGAS, 9 – snímač tlaku vzduchu v sacím potrubí, 10 – ventil zpětného vedení spalin, 11 – širokopásmová lambda sonda, 12 – planární lambda sonda, 13 – katalyzátor, 14 – nízkotlaké čerpadlo s regulátorem tlaku, 15 – řídicí jednotka, 16 – plynový pedál, 17 – vysokotlaký snímač [24]

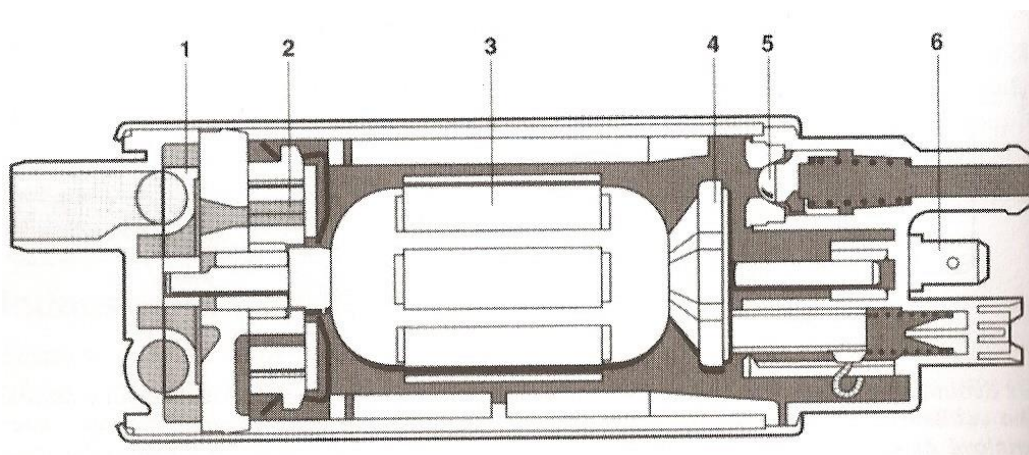
Bosch MED Motronic je jeden z nejrozšířenějších systémů přímého vstřikování na světě. Jedná se o vysokotlaký vstřikovací systém, který využívá společné rozdělovací potrubí podobně jako systém Common-rail u vznětových motorů. [4]

3.1 PALIVOVÝ SYSTÉM

Úkolem palivového systému je dopravit do válce benzín o potřebném tlaku a ve správném okamžiku. Celkově se soustava skládá z palivové nádrže, palivového potrubí, čerpadel, čističe paliva a vstřikovacího systému. Dále se soustava může rozdělit na dva okruhy (nízkotlaký a vysokotlaký) oddělené od sebe palivovým filtrem. [4]

3.1.1 NÍZKOTLAKÝ OKRUH

Nízkotlaký okruh se skládá z palivového čerpadla a mechanického regulátoru paliva umístěných přímo v palivové nádrži nebo v její blízkosti v palivovém vedení. Důležitou funkci v nádrži též zastává palivový filtr. Nízkotlakým elektrickým čerpadlem je palivo stlačeno přibližně na 350 až 500 kPa. Elektrické čerpadlo se skládá ze třech hlavních částí – čerpadlová část, elektromotor a přípojné víko. V předním úseku se nachází boční kanálové čerpadlo (první stupeň) a vnitřní zubové čerpadlo (hlavní stupeň). Na výstupní straně čerpadla se nachází přípojné víko sloužící k dočasnému udržení tlaku i po vypnutí elektromotoru. [9]

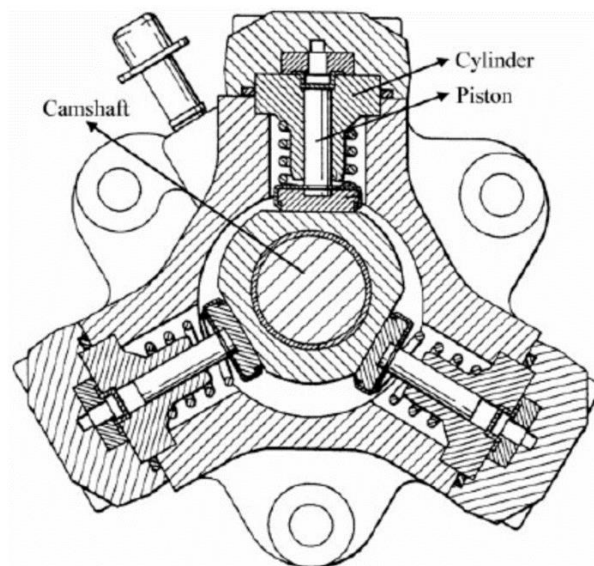


Obr. 10 Řez elektrickým čerpadlem: 1 – boční kanálové čerpadlo, 2 – vnitřní zubové čerpadlo, 3 – kotva elektromotoru, 4 – komutátor elektromotoru, 5 – zpětný ventil, 6 – konektor elektrického přívodu [6]

3.1.2 VYSOKOTLAKÝ OKRUH

Hlavní součástí vysokotlakého okruhu je vysokotlaké čerpadlo, které má za úkol zvýšit tlak paliva z 0,35 MPa na 12 MPa. Používá se mechanické čerpadlo poháněné od klikové hřídele s axiálními nebo radiálními písty. U **axiálního čerpadla** tlačí na píst talíř šikmo uložený na hnací hřídeli. Kvůli menším výkyvům tlaku je tento píst použit v jednom čerpadle víckrát. [6]

Písty **radiálního čerpadla** se ve válcích pohybují vlivem rotace výstředníku na hřídeli. Kolísání tlaku je omezeno použitím několika pístů (obvykle tří) nebo tvaru výstředníku, který zajistí více zdvihů pístu na jednu otáčku hřídele. [6]



Obr. 11 Mechanické čerpadlo s radiálními písty [11]

3.1.3 TLAKOVÝ ZÁSOBNÍK PALIVA

Zásobník paliva, tzv. „rail“, je stejně jako systém Common-rail u vznětových motorů společný pro všechny válce a zastává i funkci rozdělovacího palivového potrubí. Má tvar trubky s výstupy pro jednotlivé vstřikovací trysky, tlakový řídicí ventil a snímač tlaku paliva. Na materiál jsou kladeny zvláštní požadavky kvůli neustálým pulzacím tlaku, které jsou zapříčiněny odběry paliva vstřikovacími ventily z jedné strany a provozem vysokotlakého čerpadla ze strany druhé. Proto musí mít vysokou pružnost potřebnou pro útlum těchto pulzací, zároveň však musí být dostatečně tuhá. Jako materiál railů se tak nejčastěji volí slitiny hliníku a vyrobeny mohou být odléváním, kovááním nebo svařováním. [4][5]



Obr. 12 Tlakový zásobník paliva firmy Delphi [12]

Úkolem tlakového řídicího ventilu je udržovat v railu potřebný tlak, který se mění v závislosti na provozu motoru. Přebytečné palivo je propouštěno ventilem a potrubím dopraveno zpět do oběhu před vysokotlaké čerpadlo. [4]

3.1.4 VSTŘIKOVACÍ VENTILY

Vstřikovací ventily jsou posledním členem palivové soustavy spojujícím rail s jednotlivými válci. Vytvoření směsi u přímého vstřikování musí proběhnout během jediné půlotáčky klikové hřídele. V režimu vrstvené směsi má injektor dokonce méně než 0,5 ms na to, aby vstříknul palivo. Výstupní otvor se otevírá díky pohybu vstřikovací jehly, která se nadzvedne nebo naopak poklesne o 60 až 100 μm . Podle způsobu, jakým je jehla ovládána se rozlišují dva druhy vstřikovacích ventilů – elektromagnetické a piezoelektrické. [4]

U **elektromagnetického ventilu** je jehla ovládána pomocí kotvy elektromagnetu. Pokud vinutím elektromagnetu začne protékat proud, vytvoří se magnetické pole, které přitáhne kotvu a s ní i ventilovou jehlu. Po přerušení proudu je jehla tlačena pružinou do původní polohy a ventil se tak znovu uzavře. [4]



Obr. 13 Elektromagnetický vstřikovací ventil firmy Bosch [15]

Piezoelektrický ventil je modernější variantou používající několika set malých krystalů, které se velmi rychle roztahují, pokud jsou vystaveny působení elektrického pole (piezoelektrický jev). Tryska se tak stihne otevřít během několika milisekund. Výhodou oproti elektromagnetickým ventilům je také přesnější dávkování a rozprašování paliva. [14]



Obr. 14 Piezoelektrický vstřikovací ventil firmy Bosch [15]

Vstřikovací ventily se dále rozdělují podle geometrie výstupních otvorů na trysku s více otvory, trysku typu A a typu I. Jedním z nejběžnějších je **typ I**, který obsahuje kruhovou dutinu s kuželovým čelem. Díky této dutině klouže proud paliva po plášti kužele a vzniká tak vířivý pohyb, což napomáhá lepšímu rozprášení ve válci. Tento způsob vstřikování je ale výhodný pouze pro menší tlaky (kolem 50 barů). Při vyšších tlacích a větší hustotě vzduchu ve válci se úhel paprskového kužele paliva zmenšuje. **Víceotvorová tryska** (obvykle s šesti otvory) může pracovat i při tlaku 150 až 200 barů. V porovnání s typem I dokáže palivo proniknout do větší hloubky, zejména za studeného startu. **Tryska typu A** se jako jediná otevírá ven a díky kuželovému rozšíření otvoru má dobrý úhel vstřikovaného paprsku, který se nemění se zvětšujícím se tlakem. Rovněž díky dobré odolnosti vůči karbonizaci je tato varianta vhodná pro systémy SGDI. [6][8]

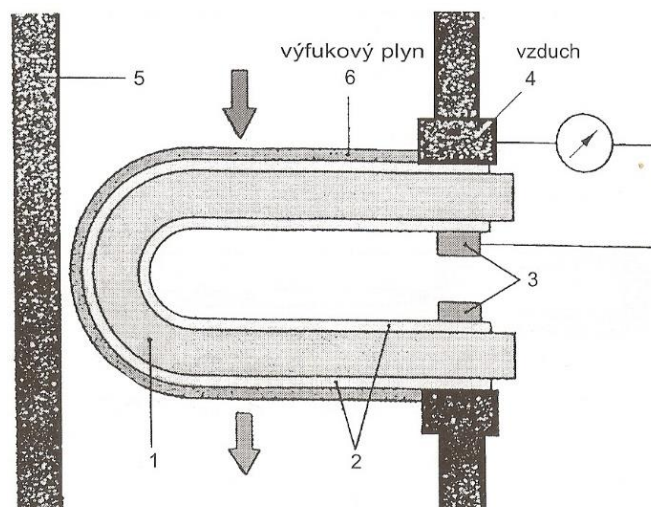
3.2 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

3.2.1 LAMBDA SONDY

Lambda sonda je nezbytnou součástí systému přímého vstřikování. Podává informace řídicí jednotce o složení spálené směsi kvůli její regulaci a řízení regenerace katalyzátoru. Tyto informace získává z množství zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Kvůli přesnosti se používá dvojice lambda sond zabudovaných před a za katalyzátorem. [6]

Napětíová lambda sonda se skládá z uzavřeného keramického tělesa (nejčastěji ZrO_2), které má na vnitřním i vnějším povrchu tenké platinové elektrody. Zatímco ve vnitřním prostoru se nachází okolní vzduch, na vnější stranu tělesa působí výfukové plyny. Pokud mají tyto dva plyny rozdílný obsah kyslíku, mezi elektrodami začne vznikat elektrické napětí. Podle naměřeného napětí se následně posuzuje, zda se jedná o chudou či bohatou směs. Použitá

keramika se však stává vodivou okolo 350°C . Proto sondy bývají vybaveny vlastním elektrickým vyhříváním, aby byly po nastartování funkční co nejdřív. [5]



Obr. 15 Schéma lambda sondy: 1 – keramika sondy, 2 – elektrody, 3 – Kontakty, 4 – upevnění v tělese, 5 – výfukové potrubí, 6 – ochranná porézní vrstva [5]

Širokopásmová lambda sonda funguje stejně jako napěťová sonda, je ale navíc vybavena přečerpávacím článkem. Díky němu je možné nejen určit o jakou směs se jedná, ale stanovit i přesné složení směsi. Porovnává se složení spalin se stálým stechiometrickým složením směsi v detekční komoře mezi přečerpávacím a měřicím článkem. Pokud se obsah O_2 u těchto dvou plynů liší, začnou se přečerpávat ionty kyslíku do detekční komory anebo z ní ven. Současně začne protékat proud, jehož hodnota vyjadřuje koncentraci kyslíku. [16]



Obr. 16 Širokopásmová lambda sonda [16]

3.2.2 KATALYZÁTORY

Úkolem katalyzátorů je přeměňování škodlivých látek ve výfukových plynech pomocí chemických reakcí. Rovněž katalyzátory jsou v provozu až od určité teploty, což znamená, že k největším emisím dochází po startu, než se katalyzátory zahřejí. Ve výfukovém systému přímého vstřikování pracují dva – třicestný a zásobníkový. [4]

Třicestný katalyzátor, umístěný blíže k motoru, je uzpůsoben k odstranění všech tří škodlivých složek, které se během spalování benzínu produkují (CO , HC a NO_x). Vyroben je z keramiky nebo z kovu s vrstvou ušlechtilých kovů (platina, paladium a rhodium). Zatímco oxid uhličitý a uhlovodíky se působením těchto ušlechtilých kovů oxidují na neškodný oxid uhličitý a vodu, oxidy dusíku se přeměňují na dusík a CO_2 . Moderní katalyzátory dokáží odstranit až 97 % HC , 96 % CO a 90 % NO_x . Tento druh katalyzátoru naplno funguje pouze při stechiometrickém režimu s odchylkou do 3 % od ideálního součinitele přebytku vzduchu. Při spalování chudé směsi totiž nedokáže zpracovat oxidy dusíku a proto je nutné použití druhého zásobníkového katalyzátoru. [17]

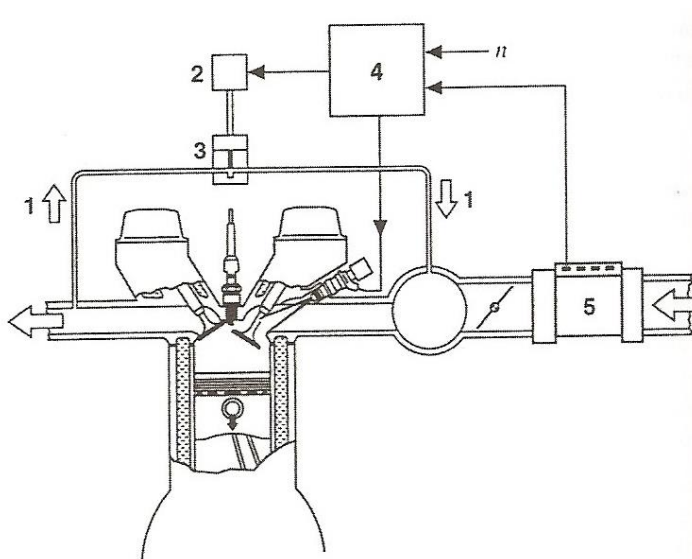
Zásobníkový katalyzátor NO_x obsahuje kromě ušlechtilých kovů také oxidy draslíku, vápníku, stroncia, zirkonu, lanthanu a barya. Díky ušlechtilým kovům funguje stejně jako třicestný katalyzátor. S použitím zmíněných oxidů je navíc schopen hromadit plyny NO_x . Ty jsou platinovou vrstvou oxidovány na NO_2 , který se následnou reakcí s příměsovými oxidy a kyslíkem přeměňuje na dusičnany. Po zaplnění zásobníku těmito dusičnany ztrácí katalyzátor schopnost ukládat další oxidy dusíku a je tak nutná jeho regenerace. Řídící jednotka proto krátkodobě přepne režim motoru na bohatou směs, čímž se získá oxid uhelnatý. Ten přetváří dusičnany zpět na oxid dusnatý, který se v poslední fázi redukuje na dusík a oxid uhelnatý. [4]

3.2.3 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Recirkulace výfukových plynů (EGR) výrazně pomáhá zásobníkovému katalyzátoru s redukcí emisí NO_x , díky čemuž se snižuje četnost regeneračních procesů katalyzátoru. Použití výfukových plynů ve spalovací směsi zmenší podíl kyslíku, čímž se sníží teplota hoření a díky tomu i produkce NO_x . Nejjednodušším způsobem, jak znovu použít již spálenou směs, je pomocí tzv. překrytí ventilů. Sací ventil se při tomto procesu otevírá, přestože výfukový ventil ještě není uzavřen. Část spalin se tak vrátí do sacího potrubí a při sacím zdvihu je dopravena zpět do spalovací komory spolu s čerstvou směsí. Tato metoda se nazývá **vnitřní recirkulace**. [6]

Podstatnějšího využití spalin je možné dosáhnout **vnější recirkulací**. Spaliny jsou u tohoto systému vytlačeny z válce a teprve potom je jejich část vedena potrubím zpět do sacího

kanálu. Množství vráceného plynu určuje elektrický ventil regulovaný řídicí jednotkou. Podíl recirkulovaných spalin ve válci se pohybuje v rozmezí 10 až 20 %. [4]



Obr. 17 Schéma vnější recirkulace výfukových plynů: 1 – zpětné vedení výfukových plynů, 2 – elektropneumatický převodník, 3 – řídicí ventil recirkulace, 4 – řídicí jednotka, 5 – měřič hmotnosti vzduchu, n – otáčky motoru [6]

K použití systémů EGR se váže i jedna důležitá nevýhoda. Tou je usazování pevných částic z výfukových plynů na stěnách a ventilech sacího potrubí. Vzniklá vrstva omezuje objem nasávaného vzduchu, což má negativní dopad na výkon i spotřebu. [18]

3.2.4 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

U přímého vstřikování benzínu dosahují emise sazí až o dva řády vyšších hodnot než motory MPI nebo vznětové motory vybavené filtry pevných částic. To je způsobeno menší homogenitou směsi především ve vrstveném režimu. Produkce pevných částic je největší u motorů se spalováním řízeném stěnou, kde dochází ve velké míře ke smáčení stěn spalovací komory. Doposud byly emise pevných částic motorů GDI omezeny pouze podle gramů na kilometr. V letošním září však vychází v platnost nová vyhláška normy Euro 6, podle které budou mít zážehové motory s přímým vstřikováním zcela stejné limity sazí jako motory vznětové. Vypuštěné částice se tak budou muset pohybovat pod hodnotou $6,0 \times 10^{11}$ na jeden kilometr. Kvůli tomu se u nových vozů očekává postupné zavedení filtru pevných částic, který by měl snížit emise až o 90 procent. Jasnou nevýhodou těchto filtrů je omezená životnost a náklady spojené s jejich výměnou. Některé automobilky se proto zavedení filtrů stále brání a místo toho plánují zvýšení vstřikovacích tlaků, což by mělo omezit samotnou tvorbu pevných částic. [8][19]

Tab. 1 Evropské emisní limity pro zážehové motory [21]

Norma	Rok	CO	HC	HC + NO _x	No _x	PM	PN
		g/km					1/km
Euro 1	1992	2,72	–	0,97	–	–	–
Euro 2	1996	2,20	–	0,50	–	–	–
Euro 3	2000	2,30	0,2	–	0,15	–	–
Euro 4	2005	1,00	0,1	–	0,08	–	–
Euro 5	2009	1,00	0,1	–	0,06	0,005**	–
Euro 6	2014	1,00	0,1	–	0,06	0,005**	6,0×10 ^{11*}

* platí od září 2017,

** platí pouze pro motory s přímým vstřikováním

4 PŘEHLED POHONNÝCH JEDNOTEK

V této kapitole je uveden stručný přehled zážehových motorů s přímým vstřikováním těch automobilek, které se v loňském roce dostaly do první desítky nejprodávanějších v Evropě. Patří sem i italská firma Fiat, ale ta pro své modely přímé vstřikování benzínu nenabízí.

Tabulka 2 Přehled pohonných jednotek s přímým vstřikováním benzínu [30]

Automobilka	Motor				
	Označení	Počet válců	Objem [cm ³]	Výkon/otáčky [kW]/[min]	Točivý moment/otáčky [Nm]/[min]
Audi	1.0 TFSI	3	999	70/5000 - 5500	160/1500 - 3500
	1.4 TFSI	4	1395	110/5000	250/1500 - 3500
	2.0 TFSI	4	1984	185/5000 - 6000	370/1600 - 4500
	3.0 TFSI	6	2995	260/5400 - 6400	500/1370 - 4500
	4.0 TFSI	8	3993	445/6100 - 6800	700/1750 - 6000
	V10 5.2 FSI	10	5204	449/8250	560/6500
	W12 6.3 FSI	12	6299	368/6200	625/4750
BMW	116i	3	1499	80/4500 - 6000	180/1250
	120i	4	1998	135/5000	290/1350 - 4250
	330i	4	1998	185/5200	350/1450 - 4800
	640i	6	2979	235/5800 - 6000	450/1300 - 4500
	340i	6	2998	240/5500	450/1380 - 5000
	550i	8	4395	340/5500 - 6000	650/1800 - 4750
Ford	1.0 EcoBoost	3	998	75/6500	170/1400 - 4000
	1.0 EcoBoost	3	998	93/6000	170/1400 - 4500
	1.5 EcoBoost	4	1499	135/6000	240/1600 - 5000
	2.0 EcoBoost	4	2000	186/5500	360/2000 - 4500
	2.3 EcoBoost	4	2261	261/6000	440/2000 - 4500
	2.3 EcoBoost	4	2264	236/5500	432/3000
Mercedes-Benz	A 160	4	1595	75/4500 - 6000	180/1200 - 3500
	A 180	4	1595	90/5000	200/1250 - 4000
	A 250 Sport	4	1595	160/5000	200/1250 - 4000
	C 200	4	1991	135/5500	300/1200 - 4000
	C 400	6	2996	245/5250 - 6000	480/1600 - 4000
	AMG C 63 S	8	3982	375/5500 - 6250	700/1750 - 4500
Opel	1.0 Turbo	3	999	85/5000 - 6000	170/1800 - 4500
	1.4 Turbo	4	1364	110/5000 - 5600	245/2000 - 4000
	1.5 Turbo	4	1490	119/5600	250/2000 - 4500
	1.6 Turbo	4	1598	147/4700 - 5500	300/1700 - 4700
	2.0 Turbo	4	1998	184/5300	400/2500 - 4000

Peugeot	1.0 PureTech	3	999	50/6000	95/3000
	1.2 PureTech	3	1199	61/5750	116/2750
	1.2 PureTech	3	1199	96/5500	230/1750
	1.6 THP	4	1598	121/6000	240/1400
	1.6 THP	4	1598	199/6000	330/1900
Renault	Energy TCe 120	4	1197	87/5000	205/2000
	Energy TCe 130	4	1197	97/5500	205/2000
	Energy TCe 150	4	1618	110/5200	220/1750
	Energy TCe 205	4	1618	151/6000	280/2400
	RS Trophy 220	4	1618	162/6050	260/2000
Škoda	1.0 TSI	3	999	85/5000 - 5500	200/2000 - 3500
	1.4 TSI	4	1395	110/5000 - 6000	250/1500 - 3500
	1.8 TSI	4	1798	132/5100 - 6200	250/1250 - 5000
	2.0 TSI	4	1984	169/4700 - 6200	350/1500 - 4600
	2.0 TSI	4	1984	206/5600 - 6500	350/1700 - 5600
Volkswagen	1.0 TSI	3	999	66/5000 - 5500	160/1500 - 3500
	1.2 TSI	4	1197	77/4500 - 5500	175/1400 - 4000
	1.4 TSI	4	1395	110/5000 - 6000	250/1500 - 3500
	1.8 TSI	4	1798	132/5100 - 6200	250/1250 - 5000
	2.0 TSI	4	1984	180/4700 - 6200	350/1500 - 4600
	2.0 TSI	4	1984	228/5500 - 6500	380/2000 - 5400

5 BUDOUCNOST MOTORŮ S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM BENZÍNU

Tato kapitola je věnována novým nekonvenčním konceptům motorů využívajících systému přímého vstřikování benzínu, které by se v nejbližší budoucnosti mohly objevit na trhu.

5.1 HCCI

Motor HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) je zajímavou kombinací vznětového a zážehového motoru, který spojuje výhody obou. Palivem je sice benzín, ale spalovací komora nemusí být vybavena zapalovací svíčkou. Benzín je vstřikován při sacím zdvihu pro vytvoření homogenní chudé směsi. Na konci komprese se potom zvýší tlak na tolik, že dojde ke vznícení jako u dieselu. Směs se tak spaluje rychleji a při nižších teplotách, což znamená nižší emise plynů NO_x a pevných částic. Navíc lze díky použití vyššího kompresního poměru dosáhnout vyšší účinnosti. Absence svíčky však znamená obtížnější kontrolu spalovacího procesu. Aby se palivo vznítilo ve správný okamžik, musí se přesně regulovat teplota ve spalovací komoře, k čemuž se používá recirkulace spalin. Mezi další nutně sledované parametry patří složení směsi, tlak ve válci, teplota okolního vzduchu a také zatížení a otáčky motoru. Oproti klasickým zážehovým agregátům se zde dosahuje vyšších tlaků, a proto je za potřebí robustnějšího motoru, což se odrazí v ceně. [26]



Obr. 18 Motor SkyActiv-G 2 automobilky Mazda [27]

Příkladem je druhá generace motoru SkyActiv-G od firmy Mazda. Pracovat by měl při kompresním poměru 18:1, což ho staví na úroveň vznětových motorů. Vybaven bude i zapalovací svíčkou, která bude iniciovat spalování pouze při studeném startu a plné zátěži. Japonská automobilka dále slibuje zvýšení účinnosti o 30 % a spotřebu 3,3 litru na 100 km. Tato pohonná jednotka by se měla objevit již příští rok v nové Mazdě 3. Pokud bude její zavedení úspěšné, Mazda předběhne společnosti Hyundai, GM a Daimler, které vývoj těchto agregátů v minulých letech rovněž oznámily. [27]

5.2 MOTOR S PROMĚNLIVÝM KOMPRESNÍM POMĚREM

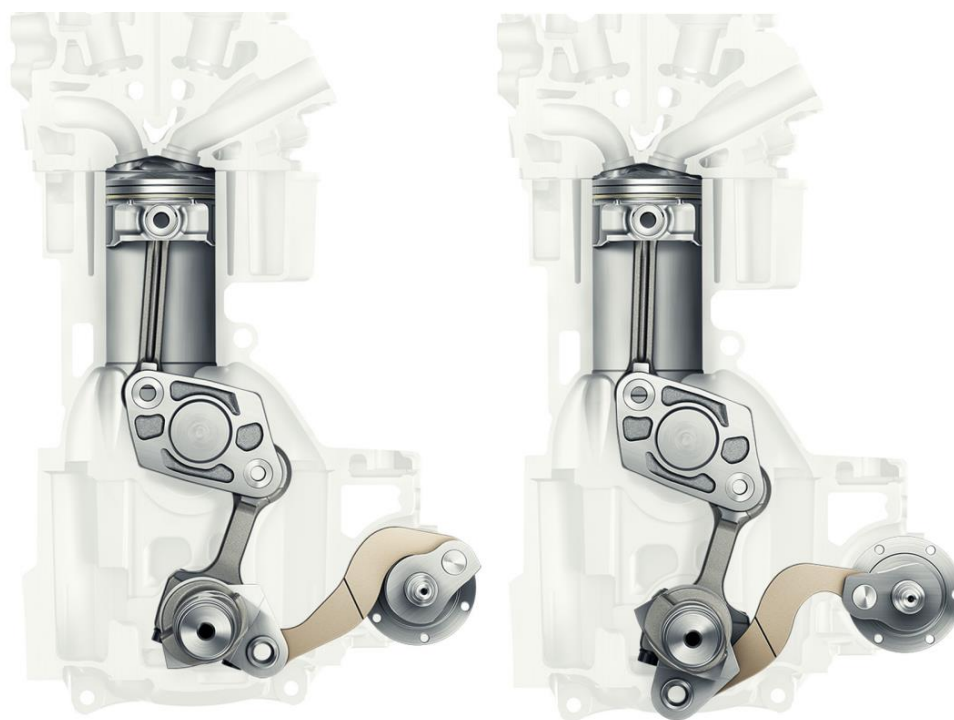
Jak už bylo naznačeno, kompresní poměr má zásadní vliv na účinnost motoru. Pro optimalizaci spalování by bylo užitečné, kdyby se tento poměr měnil v závislosti na zatížení. Realizace takového mechanismu je ovšem velice obtížná. V minulosti se o podobný motor neúspěšně pokoušela automobilka Saab, která změny kompresního poměru dosáhla naklápěním hlavy válců. Nadějněji už vypadá novinka od firmy Infinity s označením VC-T využívající přímého i nepřímého vstřikování. Japonská automobilka na ní pracovala 20 let a představila ji na loňském autosalonu v Paříži. [28]



Obr. 19 Motor VC-T automobilky Infinity [29]

Na rozdíl od konceptu Saabu je u VC-T hlava válců pevně spojena s blokem motoru. Kompresní poměr se reguluje pomocí složitého mechanismu, který mění zdvih pístu. Na hlavním čepu klikové hřídele je zde ukotveno vahadlo lichoběžníkového tvaru. Na jednom jeho

rameni je ukotvena ojnice pístu, na rameni druhém ojnice excentrické hřídele. Tato hřídel je dále spojena ovládacím ramenem s redukčním soukolím harmonické převodovky. Soukolí je řízené elektromotorem a jeho pohyb vyvolává natočení vahadla, což ovlivní výšku horní úvratě pístu. Kompresní poměr se tak může pohybovat v rozmezí od 8:1 až 14:1. Horní úvrať pístu je pro maximální výkon v nejnižší možné poloze (nízký kompresní poměr), pro úsporu paliva naopak v nejvyšší. [28] [29]



Obr. 20 Minimální (vlevo) a maximální (vpravo) kompresní poměr [28]

Podle Infinity by měl být přepínaný dvoulitrový čtyřválec VC-T v prodeji již příštím rokem a měl by nahradit nynější vidlicový šestiválec o objemu 3,5 litru. Ve srovnání s ním by měl mít nižší spotřebu o 27 %. Japonská automobilka dále hovoří o výkonu až 272 koní a maximálním točivém momentu 390 Nm. [29]

ZÁVĚR

Hlavní výhodou přímého vstřikování oproti vstřikování vícebodovému je nižší spotřeba daná režimem s vrstvenou směsí. Spalování velmi chudé směsi má však i svou stinnou stránku. Tou je vyšší produkce oxidů dusíku a pevných částic. Množství obou těchto složek vypuštěných do atmosféry je možné snížit dvojím způsobem – omezením jejich produkce nebo zachycením ve výfukovém potrubí. Pro snížení tvorby NO_x se motory vybavují systémem recirkulace výfukových plynů, zatímco pro snížení tvorby pevných částic je vhodné použití vyšších vstřikovacích tlaků. Každý vůz s přímým vstřikem benzínu navíc musí být vybaven zásobníkovým katalyzátorem NO_x a od letošního září by měl používat i filtr pevných částic. Každý z těchto aspektů se více či méně negativně projeví v ceně. Přesto jsou motory GDI stále finančně výhodnější než motory vznětové.

Přímé vstřikování benzínu je vhodné pro „downsizing“, tedy rozšiřující se trend zmenšování objemu motorů. Zejména v kombinaci s turbodmychadlem lze s menším objemem dosáhnout stejných výkonů při snížené spotřebě paliva. Díky modernější elektronice a měřicím přístrojům je také možné přesněji měřit vstupní parametry pro řídicí jednotku a dokonaleji automatizovat veškeré procesy, zejména přepínání mezi jednotlivými režimy motoru. Tím motor může dosáhnout ještě lepší účinnosti s menšími emisemi, což je dobrým předpokladem pro plnění neustále se zpřísnující emisní normy EU. Většina automobilek tak v dnešní době sází právě na přímé vstřikování. Příkladem je německý Volkswagen, který aktuálně nabízí pouze jediný litrový agregát s vícebodovým vstřikováním pro svůj nejmenší model UP!

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Gasoline direct injection. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline_direct_injection#cite_ref-5
- [2] First in Fuel Injection. Mercedes-Benz Club America [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <https://www.mbca.org/star-article/march-april-2012/first-fuel-injection>
- [3] 1954 Mercedes-Benz 300 SL Gullwing, In: *Top Car Rating* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.topcarrating.com/1954-mercedes-benz-300-sl-gullwing.php>
- [4] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003, s. 123-142, 233-236. ISBN 80-238-8765-4.
- [5] MOTEJL, Vladimír. *Vstříkovací zařízení zážehových motorů*. 3. rozšířené vydání. České Budějovice: nakladatelství KOPP, 2003, s. 11-19, 244-256. ISBN 80-7232-141-2.
- [6] FERENC, Bohumil. *Spalovací motory: Karburátory a vstříkování paliva*. Praha: nakladatelství Computer Press, 2004, s. 73-280. ISBN 80-251-0207-6.
- [7] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003, s. 83-86. ISBN 80-238-9681-4.
- [8] STONE, Richard. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 4. vydání. Londýn: Palgrave Macmillan, 2012, s. 159-174. ISBN 978-0-230-57663-6.
- [9] FERENC, Bohumil. ELEKTRONIKA A ZÁŽEHOVÉ MOTORY. In: Mjauto [online]. 2000 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.mjauto.cz/newdocs/ferenc/n2_mot/n2.htm
- [10] Fuel metering solenoid. In: *Troublecodes.net* [online]. 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.troublecodes.net/wp-content/uploads/2015/11/SS.1460569839.jpg>
- [11] High-pressure radial piston pump. In: *ResearchGate* [online]. agrbe: eafbsteg, 2012 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/270619760_fig2_Figure-2-High-pressure-radial-piston-pump
- [12] Gasoline Engine Management Systems. In: *Delphi* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/gas/injsys/gdi_fuelrails
- [13] Fuel Rail. In: *Bosch Auto Parts* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://aa-boschap-au.resource.bosch.com/media/parts/engine_systems__auto_parts/kraftstoffzuleiter_gb_734x350_w734.jpg
- [14] Autopříslušenství prvovýbava. In: *Bosch Pressforum* [online]. 2003 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=269

- [15] Gasoline direct injection. In: *Bosch Mobility Solutions* [online]. 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://products.bosch-mobility-solutions.com/en/de/_technik/component/PT_PC_BDI_Fuel-Injection-NEU_PT_PC_Direct-Gasoline-Injection_02_10181.html?compId=7872
- [16] Širokopásmová lambda sonda. In: *NGK* [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.ngk.de/cz/produkty-a-technologie/lambda-sondy/technologie-lambda-sond/sirokopasmovalambda-sonda/>
- [17] Katalyzátor. In: *Autolexicon* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/katalyzator/>
- [18] EGR (Exhaust Gas Recirculation). In: *Autolexicon* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/egr-exhaust-gas-recirculation/>
- [19] JAVOR, Vladimír. Filtry pevných částic pro benzinové motory už jsou jisté, dorazí ještě letos. *Auto iDnes.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/filtr-pevných-částic-fap-benzinový-motor-fle-/automoto.aspx?c=A170314_014134_automoto_fdv
- [20] Fuel Injection in SI engine. In: *Know IC Engine* [online]. Pune, Indie, 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://knowicengine.files.wordpress.com/2016/04/wall.jpg?w=730>
- [21] EU: Cars and Light Trucks. In: *Dieselnet* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [22] Karburátory. In: *Mechatronika* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-202_0_karburatory.pdf
- [23] The function of tumble flaps and swirl flaps. In: *Professional Motor Mechanic* [online]. 2012 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://pmmonline.co.uk/technical/the-function-of-tumble-flaps-and-swirl-flaps/>
- [24] Motronic MED. In: *Bosch Auto Parts* [online]. 2014 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://br.bosch-automotive.com/en/internet/parts/parts_and_accessories_2/motor_and_sytems/benzin/injection_system/motronic_med_1/motronic_med.html
- [25] Palivové soustavy zážehových motorů se vstřikováním paliva. PEKÁREK, Stanislav. *Technologie oprav 1: Učebnice pro 2. a 3. ročník oboru Opravář zemědělských strojů* [online]. Nový Jičín, 2016 [cit. 2017-04-22]. ISBN 978-80-88058-23-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/16.html>
- [26] HCCI - Homogeneous Charge Compression Ignition. In: *ThoughtCo.* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/hcci-homogeneous-charge-compression-ignition-85588>
- [27] Mazda to Introduce New SKYACTIV 2 Engine Using HCCI Tech in 2018. In: *The News Wheel.* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://thenewswheel.com/mazda-to-introduce-new-skyactiv-2-engine-using-hcci-tech-in-2018/>

- [28] INFINITI VC-T – Nenápadná revoluce?. In: *Automobil revue* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/infinity-vc-t-nenapadna-revoluce_45613.html
- [29] Infiniti's VC-T petrol engine could kill diesels. In: *Autoexpress* [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.autoexpress.co.uk/nissan/96667/infinity-vc-t-petrol-engine-could-kill-diesels>
- [30] *Auto-data.net* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>CFI</i>	Central Fuel Injection
<i>CO</i>	Oxid uhelnatý
<i>CO₂</i>	Oxid uhličitý
<i>EGAS</i>	Eletronic Glow Adjustable Switch
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation
<i>FSI</i>	Fuel Stratified Injection
<i>GDI</i>	Gasoline Direct Injection
<i>GM</i>	General Motors
<i>HC</i>	Uhlovodík
<i>HCCI</i>	Homogeneous Charge Compression Ignition
<i>MPI</i>	Multi Point Injection
<i>NO₂</i>	Oxid dusičitý
<i>NO_x</i>	Oxidy dusíku
<i>O₂</i>	Kyslík
<i>PFI</i>	Port Fuel Injection
<i>SGDI</i>	Spray-Guided Direct Injection
<i>SPI</i>	Single Point Injection
<i>TCe</i>	Turbo Control Efficiency
<i>TFSI</i>	Turbo Fuel Stratified Injection
<i>THP</i>	Turbo High Pressure
<i>TSI</i>	Turbocharged Stratified Injection
<i>VC-T</i>	Variable Compression-Turbocharged
<i>ZrO₂</i>	Oxid zirkoničitý
λ	[-] Součinitel přebytku vzduchu